

D-0804 温暖化が大型淡水湖の循環と生態系に及ぼす影響評価に関する研究

(4) 温暖化が底生動物と魚類に及ぼす影響評価に関する研究

滋賀県琵琶湖環境科学研究センター

熊谷道夫、石川俊之（平成20～21年度）

<研究協力者>

滋賀大学教育学部

石川俊之（平成22年度）

滋賀県立大学環境科学部

長谷川直子（平成20年度）

お茶の水女子大学人間文化創成科学研究科

長谷川直子（平成21～22年度）

平成20～22年度累計予算額：9,575千円（うち、平成22年度予算額：2,295千円）

予算額は間接経費を含む。

[要旨] 自律型潜水ロボット「淡探」を用いて、琵琶湖深底部に生息する生物の分布状況と水温および溶存酸素（D0）濃度との関連を調べた。対象は、琵琶湖固有種であるイサザである。イサザはハゼ科の魚で、絶滅危惧IA類に指定されており、近年急激に漁獲量が減少している。自律型潜水ロボット「淡探」に内蔵したデジタルカメラで浅い水域から90 mを超える水域の湖底の写真を撮り、得られた画像からイサザの生死の判別を行った。また、同時に計測した水温およびD0濃度との比較を行った。この結果、D0濃度が3 mg L⁻¹以下になるとイサザの死亡率が急激に高まることがわかった。生きたイサザが多く見られる好適な環境は、水温が12℃以下、D0濃度が4 mg L⁻¹以上の水域であることがわかった。

湖底で発見した低温水孔（Low Temperature Hydrothermal Vents）の調査を行い、Ventの存在と発生源の拡大を確認した。これらが底生生物や水質に与える影響は現段階では明確でないが、過去数年間で湖底環境が急激に変化していることの主因となっていることが推察された。地殻変動との関連も示唆された。

底生生物に好適なD0濃度と、生命維持に必要なD0濃度の違いを知るため、湖底で撮影された底生生物（魚類・甲殻類）を採取し、低D0影響評価実験を実験室内で実施した。実験対象は、琵琶湖の固有種でかつ絶滅危惧種であるイサザとアナンデールヨコエビを用いた。実験で得られた結果は、捕食者であるイサザはその餌生物であるアナンデールヨコエビに比べて貧酸素耐性が弱いことを示していた。このことから、中程度の溶存酸素低下が起きた場合1980年代半ばの底生生態系の激変と同じことが起こりうるということがわかった。いかえると、1980年代半ばのイサザの激減とアナンデールヨコエビの増加の要因のひとつとして、湖底の溶存酸素低下の可能性が示された。

[キーワード] イサザ、アナンデールヨコエビ、貧酸素耐性、水温、低温水孔

1. はじめに

地球温暖化は琵琶湖のようなサイズの湖にどのような影響を与えるであろうか。気温の上昇は、直接的に水温の上昇をもたらす。たとえば、アメリカのワシントン湖は、表面積が87.6 km²で、最大水深65.2 m、平均水深33.0 mの氷河湖である。1962年から2002年の40年間で、水深0 mから10 mまでの水柱における水温上昇は、3月から5月の3ヶ月間で1.6℃（0.04℃ year⁻¹）、12月から2月の

3ヶ月では 0.8°C ($0.02^{\circ}\text{C year}^{-1}$)であった。また、夏期の水温成層の形成開始は16日早くなり、成層の終わりは9日遅くなった。全体では、25日ほど成層期間が長くなり、鉛直混合が弱くなったことを示している¹⁾。おなじアメリカのタホ湖は、カリフォルニア州とネバダ州の境界にある深くて美しい湖で、表面積が 500 km^2 、最大水深が 505 m 、平均水深が 313 m の構造湖である。1970年から2002年にかけての32年間に、体積平均水温が $0.015^{\circ}\text{C year}^{-1}$ 上昇した²⁾。上下混合の減衰に伴って、水温躍層の厚さが減少する傾向を示している。成層が強くなることによって、小さなサイズや、浮力調整が可能な種類の植物プランクトンが優勢となっており、このことが、一次生産や、栄養塩の湖内循環および高次栄養段階の生産を変える可能性が指摘された³⁾。また、九州にある池田湖は、表面積 10.95 km^2 、周長 15.1 km 、標高 66 m 、最大水深 233 m のカルデラ湖である。1929年の調査では、透明度が 26.8 m あり、世界でも有数のきれいな湖であった。その後、富栄養化が進み1970年代には透明度が 6 m 前後となり、1980年代後半からは気温上昇に伴い上下混合が減衰し、1989年以降最深部付近の溶存酸素濃度は 1 mg L^{-1} 以下となり、回復していない⁴⁾。

一方、琵琶湖は、1960年後半から、高度経済成長の影響で富栄養化が進行し、1977年に淡水赤潮が発生した。その後、富栄養化防止条例が1980年に施行され、急激な富栄養化の進行には歯止めがかかったかに思われたが、1985年頃より、気温が上昇し、湖底付近の水温が上がり始めた。また、冬期鉛直混合の減衰に伴って、湖面から湖底への酸素供給が不活化し、湖底付近の溶存酸素濃度が減少する一方、湖底から溶出した窒素やリンが深水層に蓄積するようになった⁵⁾。

酸素濃度の低下は、生物の生存に大きな影響を与える。水生生物が溶存酸素(DO)の低下によって受ける影響は、さまざまな段階の現象として現れる。このうち、もっとも深刻な影響は死亡である。死亡は呼吸に必要な酸素が欠乏しておこることが普通である。生物の多くは短期間であれば酸素がない状態でも耐えることができるが、この期間は生物種や個体の状態によって異なる。このように、酸素の少ない状態に耐えた場合においても、無酸素状態で生成される物質(例えば硫化水素)の毒性によって死亡する場合もありうる。

死亡に至らないが次に深刻な状況として、酸素低下による活動の大幅な制限を挙げることができる。生命の維持に必要な最低限の酸素は入手できるものの、それ以外の活動に必要な酸素が得られない状態である。このような状況下では動物は移動をすることができず、餌を入手することが困難になる。このような状態が長く続けば、やがて餓死するであろう。また、酸素低下時に強い外敵が出現した場合には逃れることができないし、仮に酸素濃度の高い逃避場所があってもそこに移動することができない。また、酸素低下によって摂食速度が低下すれば、体の成長や繁殖に使うエネルギーや物質の量が減ることにつながる。このことを、個体ではなく、個体の集合すなわち個体群で影響を評価するのであれば、個体数の低下という形で影響が表れるであろう。

溶存酸素の低下に対する評価は、これまでも様々な方法で取り組まれてきた。死亡に至る影響としてよく使われているのが、半数致死濃度(Lc50)である。対象となる生物を通常24時間あるいは48時間、溶存酸素濃度が決められた容器内で飼育し、異なる溶存酸素濃度での死亡率の曲線をもとに、50%が死亡する溶存酸素濃度を求めるものである。この方法は十分な個体数を安定して飼育できる生物には有力な方法である。また、実験デザインを適切に行えば、50%に限らず死亡率と溶存酸素濃度の対応が得られるため、予測モデルをたてやすい。Lc50が魚類でよく使われるのに対して、魚類に加えて無脊椎動物でもよく使われる評価手法がPc (Pressure of critical oxygen concentration)の測定である。この手法では、さまざまな溶存酸素濃度で対象となる生物

の呼吸速度を測定し、呼吸速度が急激に減少する溶存酸素濃度を P_c として推定するものである。一個体あるいは複数個体で測定できることや、生死の判別が付けにくい生物でも実験が可能である点が利点である。一方、呼吸速度の測定や分析手法がやや煩雑であることが難点である。

本サブテーマでは、自律型潜水ロボットを用いた湖底環境とイサザの生息域の調査と、実験室における底生動物の低酸素耐性の解明を行い、琵琶湖の底生生態系に対する温暖化影響の評価に資することを目的とした。

2. 研究目的

(1) イサザの分布域と湖底環境の把握

自律型潜水ロボット「淡探」を用いて、琵琶湖深底部に生息する生物の分布状況と水温および溶存酸素（溶存酸素）濃度との関連を調べる。特に、琵琶湖の固有種であるイサザ（ハゼ科の魚で、絶滅危惧IA類に指定されており、近年急激に漁獲量が減少している）に着目し、「淡探」の腹部に設置したデジタルカメラで画像を撮り、得られた画像からイサザの生死の判別とサイズの計測を行う。また湖底の低温水孔（Low Temperature Hydrothermal Vent）を調査し、Ventの存在と発生源の拡大および湖底環境に及ぼす潜在的な影響を調べる。

(2) 室内実験による琵琶湖の底生動物に対する低酸素化の影響評価

湖底に生息する底生生物（イサザおよびアナンデールヨコエビ）を採取し、低溶存酸素濃度に対する応答を実験的に調べる。具体的には、底生生物の活動に影響を及ぼす溶存酸素濃度の閾値（ P_c 値）を求める。

3. 研究方法

(1) 自律型潜水ロボット「淡探」を用いた野外調査

「淡探」は自律型潜水ロボットで、全長2 m、空中重量が180 kgある⁶⁾。前方に2台のハイビジョン対応ビデオカメラ（SONY SD12）と、腹部に1台のデジタルカメラ（NIKON COOLPIX5000）、そして水温や溶存酸素濃度などを計測する水質センサー（F-Probe）を装備している。淡探の特徴は、湖底に沿って一定の高度で運航できることである。このことによって、湖底をかく乱することなく湖底近傍の環境を詳細に監視することができる。

本研究では、2001年12月から2010年12月までの淡探を用いた湖底調査で得られたデータを解析した。湖底上1 mの高度を保って移動する淡探が撮影したデジタルカメラの画像を元に、撮影された底生生物の同定と個体数計数を行った。淡探の走行速度は1ノット（ 0.5 m s^{-1} ）で、20秒ごとにストロボ撮影を行ったので10 m間隔で撮影されたことになる。画像は調査終了後に回収し、解析に供した。また、同時にF-Probe（高精度水質計）で測定した水深・水温・溶存酸素濃度などの環境データと画像を突き合せて解析を行った。

また、2007年に記録した湖底付近の低酸素状態を解析する目的で、2009年12月25日から27日にかけて淡探を用いた湖底調査を行った。12月25日に1回、26日と27日に各2回の調査を行うことができた。この運航で、初めて低温水孔の撮影に成功した。

さらに低温水孔の確認のため、2010年4月26日と28日の両日に2回ずつ淡探による湖底調査を行った。2009年から2010年にかけての調査水域は図1のとおりである。F-Probeによって湖底付近で

確認された水温逆転層を確認するために、RBR社製の高精度水温計（分解能0.0001℃、精度0.002℃）を淡探の上下に装着し連続的な水温観測を行った。上下の水温計の高度差は0.58 mであった。さらに、2010年12月16日から18日にかけて、淡探による同様な調査を行った。この時も、RBRの水温計を淡探に搭載した。上記のすべての調査において、淡探は北から南もしくは南から北へ直線的に移動しており、映像や画像および水質の各データに、淡探自体の航行による影響は含まれていない。



図1 観測場所。図中、実線は2007年12月から2010年12月までの淡探の運航経路。赤丸は、水温計と流速計の係留場所。

(2) 室内実験

Pcを求めるために琵琶湖深底部で漁獲される代表的な底生魚であるイサザ (*Gymnogobius isaza*; ハゼ科) と、深底部の無脊椎動物として大きな生物量が報告されているアナンデルヨコエビ (*Jesogammarus annandalei*) を実験で用いた。この2種は捕食者と被食者の関係にある。実際、アナンデルヨコエビの生息密度がイサザの量の増減によって影響を受けることが、既存の研究で報告されている⁷⁾。また、この2種は琵琶湖の固有種であり、保全対象としての重要度も高く、最新のレッドデータリストにおいて、イサザは絶滅危惧IA (CR)、アナンデルヨコエビは準絶滅危惧 (NT) となっている。

琵琶湖の湖底を代表する2種は、それぞれ琵琶湖中層の代表的な遊泳種であるビワマス (*Oncorhynchus masou rhodurus*) が好んで利用する餌として知られている。このため、イサザやアナンデルヨコエビに対する溶存酸素低下の影響を評価することは、琵琶湖の水温躍層以深の高次捕食者への影響を検討するために不可欠なものであるといえる。

Pcを求める実験に用いたイサザは、漁業者より購入したものをを用いた。漁業者によればイサザは主に琵琶湖の北東の端にある塩津湾で採取されたものである。この水域は著しい溶存酸素低下が報告されていないことから、溶存酸素低下によるストレスを経験していない個体であると推測することができる。イサザは水槽の飼育が容易ではなく、漁業者から入手した個体の大半は数日のうちに死亡してしまった。そのため、実験に用いる個体は漁業者から入手後、1週間以上水槽で飼育し、生存したものをを用いた。この間、水槽は8℃に設定した低温インキュベーター内に設置し、暗条件で常にエアレーションを行った。

アナンデルヨコエビは、琵琶湖北湖に設置した係留機器を回収した際に、係留ロープに付着した個体を集めることで入手した。係留場所は安曇川沖から今津沖の水深70 m~90 mの複数の場所である。アナンデルヨコエビは8月から10月ころに世代交代を行い、新しい世代の個体はしばらく水中を遊泳していることが知られている。このため、湖底の溶存酸素低下の影響は湖底を利

用する親世代で顕著であると考えられる。そこで、実験では8月以降に得られた親世代の個体を用いた。得られたアナンデルヨコエビ個体は、数日間8℃に設定した低温インキュベーター内に設置したガラス容器内で飼育した。飼育は暗条件で、エアレーションの無い状態で行った。

イサザ、アナンデルヨコエビともに、実験中および実験前に用いた水は、琵琶湖北湖の30 m以深で採水した湖水である。また、飼育温度が8℃と十分低く、より高い水温条件に比べて給餌の有無による絶食状態の影響が小さいものと判断し、実験前、実験中ともに餌を与えなかった。実際、実験と同時期に飼育した個体を無給餌で飼育したが、1か月程度は生存させることに成功しており、飢餓によって実験結果が受ける影響は小さいものと判断される。Pcの値は密閉した容器内に対象となる生物を入れ、溶存酸素センサーを用いて溶存酸素の減少を記録したデータをもとに求めた。

イサザを用いた実験では、300 mLのフラン瓶に前述の琵琶湖水を満たし、その中にイサザを1個体入れた。イサザの体長はフラン瓶よりも小さく、実験容器内で正常な姿勢を保つ空間は十分あった。フラン瓶の上部の開口部には、蛍光式溶存酸素センサー(LD0101, Hach Company)を設置し、開口部とセンサーの間にはブチルゴムテープを用いて密閉した。蛍光式溶存酸素センサーは指示器(Hq40d)に接続し、1分ごとの読み取り値をメモリーに記録した。実験は十分な溶存酸素濃度(8 mg L⁻¹以上)の状態から開始し、イサザ個体の死亡・あるいはセンサーの読み取り下限値(0.01 mg L⁻¹)に達するまで継続した。

アナンデルヨコエビを用いた実験では、100 mLのフラン瓶に前述の琵琶湖水を満たし、その中にアナンデルヨコエビを5個体前後入れた。フラン瓶の上部の開口部には、蛍光式溶存酸素センサー(LD0101, Hach Company)を設置し、開口部とセンサーの間にはブチルゴムテープを用いて密閉した。蛍光式溶存酸素センサーは指示器(Hq40d)に接続し、1分ごとの読み取り値をメモリーに記録した。実験は十分な溶存酸素濃度(8 mg L⁻¹以上)の状態から開始しセンサーの読み取り下限値(0.01 mg L⁻¹)に達するまで継続した。

記録した溶存酸素濃度は1分ごとの値であり、分解能は0.01 mg L⁻¹である。このまま1分ごとの溶存酸素減少速度を算出すると、ゼロやマイナスの値もでやすい。これは、水温が低く1分ごとの減少速度はこの分解能では測定できないことに加え、実験用の瓶内の水は外力を使って攪拌されておらず。実験に用いた生物の動きや瓶内のわずかな水温差による対流によって攪拌されていることも関係している。

そこで、イサザについては1時間ごとの平均値(60の記録値の相加平均)、アナンデルヨコエビについては4時間ごとの平均値(240の記録値の相加平均)をまず算出した。次に、イサザについては1時間後、アナンデルヨコエビについては4時間後の平均値との差を用いて、1時間あたりの溶存酸素減少速度を求めた。本研究では、この溶存酸素減少速度が急激に変化する溶存酸素濃度をPcとした。

溶存酸素減少速度が急激に変化する溶存酸素濃度を求めるために、上記のように求めた溶存酸素減少速度と溶存酸素濃度の値を用いて、折れ線回帰と呼ばれる統計手法によりPcを推定した。折れ線回帰は統計パッケージRver. 2.12.2 (R Development Core Team, 2005)の追加パッケージ”segmented”⁸⁾を用いて行った。

4. 結果・考察

(1) 自律型潜水ロボット「淡探」を用いた野外調査

本研究で実施した2008年12月、2009年12月、2010年4月の淡探による湖底調査に2002年12月以降の調査の結果を加えて、イサザの生存条件を制限する水温と溶存酸素濃度を調べた。イサザの個体数判定は、湖底上1mの高度で連続的に撮影されたデジタル写真を用いて行った。死んだイサザは、魚体の周辺がバクテリアによって白くなるので容易に判定することができた。写真と水質項目との突合せは、投入時のGPSの標準時間によって合わせた時計を基準として行った。図2に結果を示す。これによると、生きているイサザが確認されるのは溶存酸素濃度が 3 mg L^{-1} 以上で、 $2\text{--}3 \text{ mg L}^{-1}$ の濃度では生きたイサザと死んだイサザが混在し、 2 mg L^{-1} 以下では、死んだイサザしか確認できなかった。このことは、次節で議論される実験室で得られた数値と比較しても、妥当な濃度であると思われる。

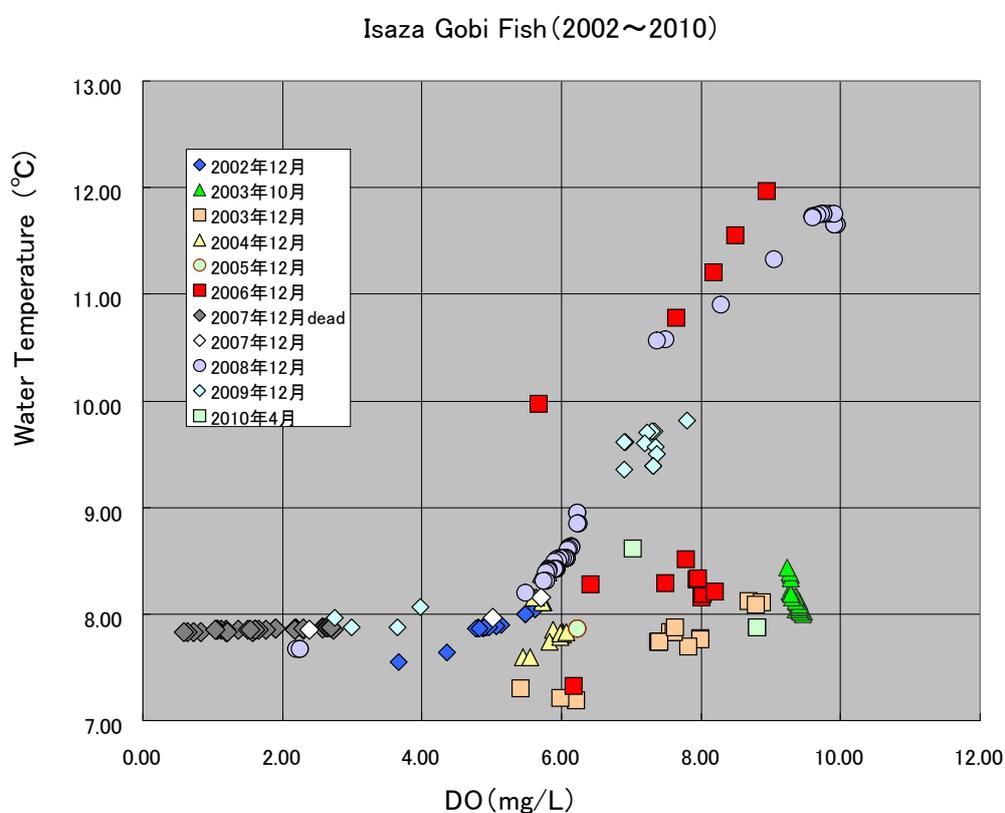


図2 琵琶湖湖底におけるイサザの生息環境。それぞれのシンボルはイサザ個体が観察された地点の溶存酸素濃度と水温を示す。ただし、灰色のシンボルは死亡個体、それ以外は生存個体を表す。

次に特筆すべき湖底環境の異変について述べる。2009年12月24日から27日にかけて、淡探を用いた湖底環境調査を行った。その結果、北湖最深部（水深90-104m）付近で、複数の場所から湖底堆積物が湖底から吹き上げられている映像を撮影した（図3）。このような湖底堆積物の噴出の原因としていくつかの要因が考えられるが、2009年7月と2010年8月に実施した流速計や濁度計を併用した調査によって、流動場の不安定による湖底からの巻上げではないことが明らかになった。



図3 2009年12月
27日、淡探が撮影
した湖底からの水
煙（水深90 m）

2010年4月26日と28日に実施した淡探の調査では、湖底直上の水温勾配を測定した。この結果、かなり広範囲の場所で水温逆転が起こっており、温度逆転の最大値は、 $0.04^{\circ}\text{C m}^{-1}$ であることがわかった。同様な調査は2010年12月にも実施しており、同じ水域で温度逆転があることを確認した。通常、このような温度逆転は不安定であるので、短時間で上下混合を引き起こして安定になるものと考えられるが、不安定な水域がこのように広範囲でかつ長期間にわたって存在することは、湖底に何らかの熱源が常に存在することを示唆している。また、2007年以降、湖底からの泥の巻き上げが顕著となり、低温水孔が見られるようになってきた。この数値は、2010年4月までは1 kmあたり1~2個であったが、2010年12月には1 kmあたり9~10個と急激に増えてきた（図4）。国土地理院が行っているGPSによる地殻変動情報によると、この地域で2010年8月30日に約2 cmの南西方向へのずれ振動を記録しており、その後に低温水孔の数が急に増加しており、地殻活動との関連も否定できないものと思われる。

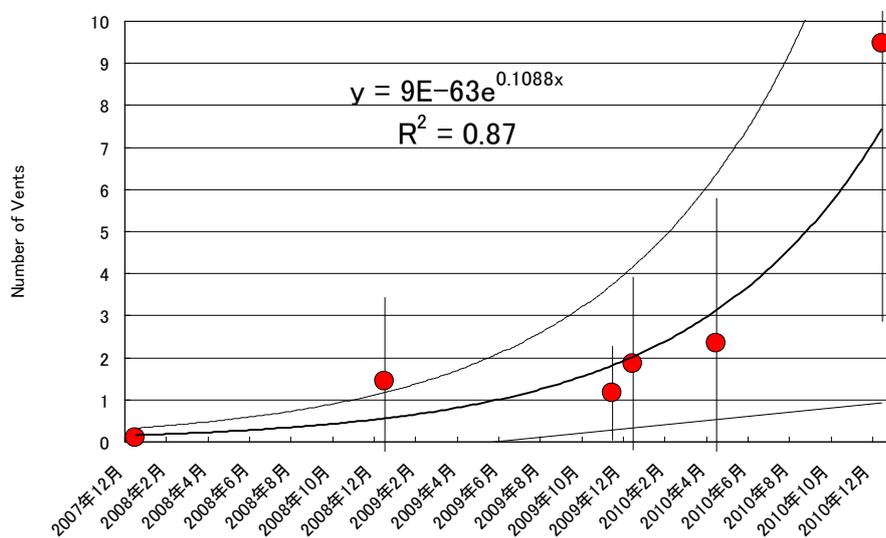


図4 低温水孔の数の時系列変化。丸印は平均値で、実線は標準偏差を表している。

(2) 室内実験

イサザの室内実験では、8回（8個体）分のデータを得ることができた。実験中、明らかに溶存酸素濃度が高い状態で死亡した試行はこれに含めていない。実験中は溶存酸素の低下が 2 mg L^{-1} あたりまではほぼ直線的にすすみ、その後カーブがゆるくなった。一例として、1時間ごとの溶存酸素減少速度と溶存酸素濃度の関係を示したものが図5である。このデータに対して折れ線回帰を

行くと、Pc値として $1.76 \pm 0.16 \text{ mg L}^{-1}$ という値が得られる（±は推定値の95%信頼区間）。8回の試行によって得られたPcの推定値は、最低で 1.06 mg L^{-1} 、最高で 2.657 mg L^{-1} であり、平均値は 1.72 mg L^{-1} 、その分散は0.49であった。

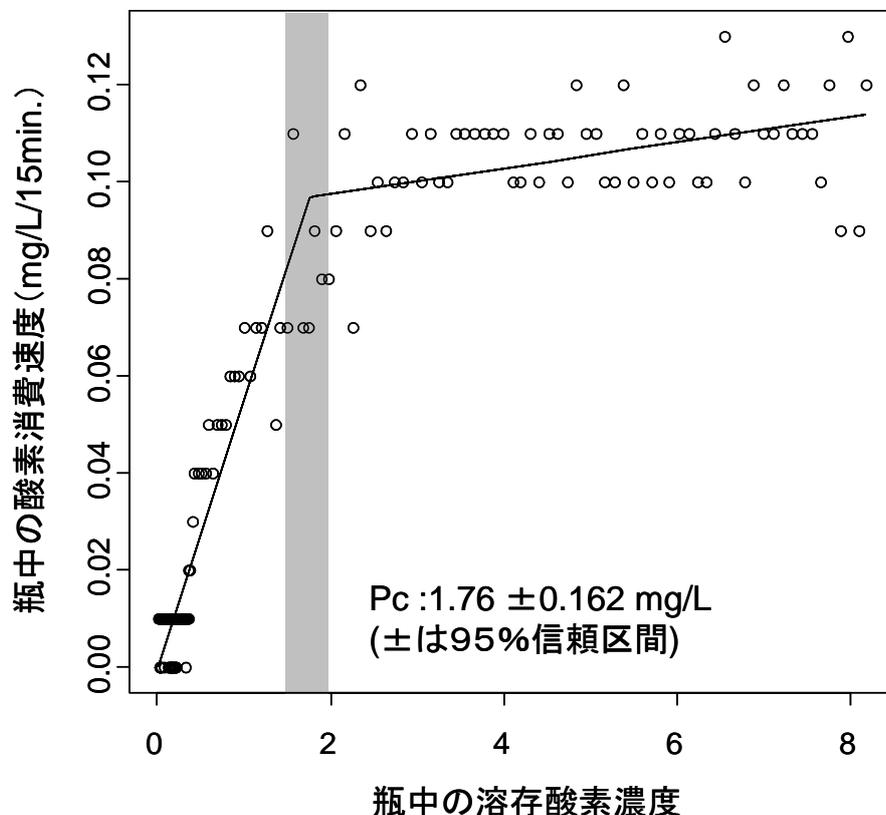


図5 イサザを用いたPc実験結果の一例。

アナンデルヨコエビの実験は、当初1個体で試行を行ったが、容器に対して呼吸速度が小さかったため実験時間が長くなり、測定機器の記録能力をオーバーすることや、容器の密閉が保てずに実験を中断せざるを得ない状況が生じた。そこで、1個体ではなく、5~10個体を用いた試行を行い、2回分のデータを得た。この2回の試行で得られたPc値は、 $1.08 \pm 0.10 \text{ mg L}^{-1}$ 、 $0.98 \pm 0.07 \text{ mg L}^{-1}$ （±は推定値の95%信頼区間）であり、平均は 1.03 mg L^{-1} であった。2回の試行ではあるが、実験に使用した個体数として考えれば十分な繰り返しがあったものと考えられる。

本研究では、イサザとアナンデルヨコエビのPc値を比較すると、イサザのPc値がより高い値であった。このことは、溶存酸素が減少していく過程において、イサザがより早く影響を受けることを示している。イサザで得られた $Pc=1.72 \text{ mg L}^{-1}$ という値は、一般に貧酸素状態の判断基準とされる 2 mg L^{-1} に比べて若干低い。Pc値とはその生物が通常の活動を休止し、生命維持に必要な代謝活動も強度も低下させる溶存酸素濃度であると考え、イサザは、一般の貧酸素判断基準値（ 2 mg L^{-1} ）であっても、個体の活動に制限がかかった状態に陥っている、ということが、本研究の結果から推察することができた。

一方、今回評価したPc値は、個体の代謝について扱った値に過ぎず、個体の集団つまり個体群に与える影響については直接的な評価につながらない。このため、個体数がどのように変化するか、いいかえれば絶滅確率がどのように変化するか、ということについては直接的な答えを示す

ことはできない。ただし、Pc値を下回る溶存酸素濃度にさらされた状況下では、活動が制限され、通常の摂食活動も期待できないため、その状況が長期間続けばやがて死亡につながると考えられる。また、短期間であっても摂食活動の制限が成長の低下につながれば、産卵数の低下につながり、ひいては個体数の減少につながるであろう。このようなことを定量的に議論するためには、Pc値よりもより高い溶存酸素濃度での行動影響を評価していく必要があるだろう。具体的には、1) Pc値以上の溶存酸素濃度条件下における摂食活動や遊泳能力の低下についての実験（後者は捕食者からの回避能力に関連する）、2) Pc値近傍の溶存酸素濃度における絶食状態への耐性の実験である。この2点があれば、より深い議論が可能になると思われる。さらに付け加えるのであれば、個体群への影響を正しく評価するため、影響の対象となる生物種が該当する湖沼でどのような分布をしているか、生息数がどれくらいと推定できるか、通常の状態をきちんと把握しておくことが重要である。湖底で溶存酸素濃度が大きく減少する事象を想定する場合、個体群を対象に評価する場合は、ある基準（例えば本研究で用いたPc値）を下回る水域に生息する個体数と、個体群全体に対するその割合が不可欠だからである。

以上をまとめると、琵琶湖深底部を代表する種であるイサザ（魚類）とアナンデルヨコエビ（甲殻類）が、呼吸活動を下げ、活動に強く制限がかかる溶存酸素濃度（Pc）について測定を試み、値を得ることができた。Pc値はイサザ、アナンデルヨコエビでそれぞれ 1.72 mg L^{-1} 、 1.03 mg L^{-1} であった。このようにPc値を使うことによって、個体数を多数集めることが困難であるが、短期間であれば飼育できる生物について溶存酸素低下の影響の受けやすさを示すことができた。湖底に生息する生物の多くは、飼育法が確立しておらず数多くの個体数をそろえることが困難なため、本研究が検討を進めた手法は、湖底の生物への溶存酸素低下の影響評価の手法として、今後大いに活用できるものと考えられる。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

琵琶湖の固有種であるイサザに着目した調査を行った。イサザはハゼ科の魚で、絶滅危惧IA類に指定されており、近年急激に漁獲量が減少している魚である。淡探の腹部に設置したデジタルカメラで画像を撮り、得られた画像からイサザの生死の判別と同時に計測した水温およびDO濃度との比較を行った。この結果、DO濃度が 3 mg L^{-1} 以下になるとイサザの死亡率が急激に高まることがわかった。生きたイサザが多く見られる好適な環境は、水温が 12°C 以下、DO濃度が 4 mg L^{-1} 以上の水域であった。

また2008-2009年に確認された低温水孔（Low Temperature Hydrothermal Vents）の再調査を行い、Ventの存在と発生域の拡大を確認した。これらが底生生物や水質に与える影響は現段階では明確でないが、過去数年間で湖底環境が急激に変化している原因のひとつであることが明らかになった。

琵琶湖の底生生態系の長期変化について、1980年代半ばにアナンデルヨコエビの急増とイサザの激減が指摘されていた⁷⁾。今回実験で得られた結果は、捕食者であるイサザはその餌生物であるアナンデルヨコエビに比べて貧酸素耐性が弱いことを示している。このことから、中程度の溶存酸素低下が起きた場合1980年代半ばの底生生態系の激変と同じことが起こりうることを示唆している。すなわち、1980年代半ばの変化の要因のひとつとして湖底の溶存酸素低下の可能性

を示したものである。

(2) 環境政策への貢献

本研究で得られた結果は、琵琶湖の湖底の溶存酸素低下が底生生態系に与える影響を観測するうえで重点を置くべき生物種について科学的な根拠を与えるものであり、今後滋賀県をはじめ琵琶湖の保全にかかわる行政の各部局に対して、本研究の成果を示していく予定である。

また、環境省がアジアにおける環境行政担当者に対して実施する第2回アジア水環境パートナーシップ (WEPA) 国際ワークショップに招聘され、地球温暖化が琵琶湖に与える影響について講演を行った。

関西サイエンスフォーラムの地震予知シンポジウムにおいて低温水孔について紹介し、地殻変動と湖底環境異変について議論を行った、これについては、今後更なる検証がなされる予定である。

6. 引用文献

- 1) Winder, M. and D. Schindler (2004) Climatic effects on the phenology of lake processes. *Global Change Biology*. 10: 1844-1856.
- 2) Coats, R., J. Perez-Losada, G. Schladow, R. Richards and C. Goldman (2006) The warming of Lake Tahoe, *Climate Change*. 76: 121-148.
- 3) Winder, M. and D.A. Hunter (2008) Temporal organization of phytoplankton communities linked to physical forcing. *Oecologia*. 156: 179-192.
- 4) 清原拓二、實成隆志、吉留雅仁、末吉恵子、寶未俊一、宮田義彦 (2007) 池田湖の水質変動に関する調査研究—透明度、COD及び水温の長期的変動—、鹿児島県環境保健センター所報、8: 41-47.
- 5) Kumagai, M. (2008) Lake Biwa in the context of world lake problems. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*, 30: 1-15.
- 6) Kumagai, M., T. Ura, Y. Kuroda and R. Walker (2002) A new autonomous underwater vehicle designed for lake environment monitoring. *Advanced Robotics*. 16: 17-26.
- 7) Ishikawa, T., T. Narita and J. Urabe (2004) Long-term changes in the abundance of *Jesogammarus annandalei* (Tattersall) in Lake Biwa. *Limnology and Oceanography*. 49: 1840-1847.
- 8) Muggeo, V.M.R. (2003) Estimating regression models with unknown break-points. *Statistics in Medicine*. 22: 3055- 3071.

7. 国際共同研究等の状況

アメリカ合衆国カリフォルニア大学デービス校

G. Schladow 教授と2011年3月7日に以下の事項について議論した。

Implications of Climate Change on Sediment-Water Interactions in Lakes and Reservoirs

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上发表

<論文(査読あり)>

- 1) 熊谷道夫、石川俊之、田中リジア (2009) 自律型潜水ロボット淡探 (たんたん) による湖底調査, 日本ロボット学会誌, 27, 278-281
- 2) C.H. Hsieh, K. Ishikawa, Y. Sakai, T. Ishikawa, S. Ichise, Y. Yamamoto, T.C. Kuo, H.D. Park, N. Yamamura and M. Kumagai (2010) Phytoplankton community reorganization driven by eutrophication and warming in Lake Biwa. *Aquatic Sciences*. 72: 467-483
- 3) N. Itoh, S. Tamamura, T. Sato and M. Kumagai (2010) Elucidation of polycyclic aromatic hydrocarbon sources in the suspended matter in Lake Biwa, Japan. *Limnology*. 11: 241-250

<査読論文に準ずる成果発表>

該当せず。

<その他誌上发表(査読なし)>

- 1) 熊谷道夫、石川俊之 (2010) 湖底探検〜びわ湖の底はどんな世界〜. 琵琶湖博物館、図録
- 2) 熊谷道夫 (2010) 地球温暖化による湖沼環境の変化と生態系への影響. 資源環境対策. 46: 43-49.

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 長谷川直子、熊谷道夫: 陸水学会関東支部会、東京 (2009) 「琵琶湖北湖における冬季の密度流」
- 2) 長谷川直子、熊谷道夫: 日本陸水学会第74回大会、大分 (2009) 「琵琶湖における冬季の深層密度流」
- 3) 長谷川直子、新井正: 日本陸水学会第74回大会、大分 (2009) 「近年の気候変動と池田湖湖水の変動」
- 4) 熊谷道夫: 第14回PPNW国際ワークショップ、アイスランド (2010) 「成層期に琵琶湖湖底に形成される境界層の物理的特性」
- 5) K. Kumagai: SIL meeting, South Africa (2010) “Ecological gradient along the bottom slope of Lake Biwa observed by the Autonomous Underwater Vehicle Tantan”
- 6) 熊谷道夫: 第2回WEPA国際ワークショップ、東京 (2010) 「地球温暖化が琵琶湖に与える影響」
- 7) 熊谷道夫: 日本陸水学会第75回大会、弘前 (2010) 「湖底境界層の動態」
- 8) 長谷川直子ほか: 日本陸水学会第75回大会、弘前 (2010) 「強風時における琵琶湖北湖の水温の東西不均一性」
- 9) 長谷川直子ほか: 日本地理学会秋季学術大会、名古屋大学 (2010) 「近年の気候変動による琵琶湖湖水への影響と将来課題」

(3) 出願特許

特に記載すべき事項は無い。

(4) シンポジウム、セミナーの開催

- 1) 琵琶湖における数値計算勉強会（2010年3月10日、琵琶湖環境科学研究センター、参加者10名）
- 2) 琵琶湖のヒ素に関する勉強会（2010年3月25日、琵琶湖環境科学研究センター、参加者15名）
- 3) 水底境界層の動態に関する勉強会（2011年3月7日、琵琶湖環境科学研究センター、参加者20名）

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 毎日新聞（2008年8月31日、地方版、13面）
- 2) 毎日新聞（2008年11月29日、地方版）
- 3) 京都新聞（2008年12月8日、地方版）
- 4) 京都新聞（2010年2月26日、近畿版）
- 5) 毎日新聞（2010年2月28日、全国版、13面）
- 6) 朝日新聞（2010年3月1日、地方版）
- 7) 読売新聞（2010年3月1日、地方版）

(6) その他

第18回企画展示．湖底探検．滋賀県立琵琶湖博物館（2010）．